



TITLE:

量子論と一般確率論における両立  
不可能性と合成系の研究(  
Abstract\_要旨)

AUTHOR(S):

濱村, 一航

---

CITATION:

濱村, 一航. 量子論と一般確率論における両立不可能性と合成系の研究.  
京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22410>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	濱村 一航
論文題目	量子論と一般確率論における両立不可能性と合成系の研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>量子論を古典論と異にする大きな特徴の一つに操作の両立不可能性がある。この両立不可能性とそれと関連する合成系について本論文では研究を行っている。</p> <p>第1章では序論として研究の背景と動機の説明、また論文の構成が述べられている。ここでは両立不可能性は既存研究における例を取り上げる形で説明がなされており、第2章以降に登場する定義への導入となっている。</p> <p>第2章では論文全体に渡って用いられる量子論の数学的定式化と、第4章と第6章に用いられる一般確率論の枠組みが紹介されている。量子論の定式化については特にその操作について一般的な記述が与えられており、操作の出力空間に応じて物理量（POVM）と状態変化（量子チャネル）という二つの操作クラスの定義が与えられている。一般確率論については、その定義が与えられるとともに、例として gbit に関する詳細な記述がなされている。また、一般確率論の定式化を用いた広い枠組みの中で、両立不可能性の概念が数学的に定義されている。</p> <p>第3章では、量子論における物理量と量子チャネルとの両立不可能性が論じられている。本論文では既存の両立不可能性に関する研究とは異なり、構造論的、あるいは定性的な定式化によるアプローチを採用している。すなわち、「大きな情報を得る物理量の測定には量子状態の大きな攪乱が伴う」という情報攪乱関係が定量的な指標をアприオリに導入することなく考察されており、この関係の質的表現とも呼べるものが提示されている。具体的には、状態識別能力と量子チャネルにより擾乱されない物理量に着目し、物理量と量子チャネルの空間にそれぞれ半順序構造を定義し、それらの関係を数学的に厳密な手法により調べている。また、この半順序構造を保存する関数の一つ導入され、主定理の応用として情報攪乱定理の新たな定量的表現も得られている。</p> <p>第4章では、合成系の研究として、物理量のエンタングルメントに関する話題が調べられている。両立不可能性の定式化には、二つの系を合わせた合成系の概念が必要である。量子論の公理において、これはヒルベルト空間のテンソル積で表されると規定されている。しかし、一般確率論をもとにした操作論的な考え方では状態空間のテンソル積は一意的には定まらない。本章では、このテンソル積の構造を操作論的、また実験可能な観点から定める手法を提供するということを目指した研究が説明されている。具体的には、物理量のエンタングルメントという概念が導入され、その有無が判定できる新たな不等式（双対版 CHSH 不等式）が導かれている。また、本章ではこの不等式の実験的検証も IBM の量子コンピュータを用いて行われている。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	濱村 一 航
<p>第5章は、両立不可能性の応用的研究に相当し量子コンピュータに関するものである。近年、量子コンピュータの開発が進んでおり、ある量子系をシミュレートするには量子コンピュータのほうが古典計算機よりも有利であるということが示されつつある。本章では、今後量子コンピュータの開発がさらに進んだ際に適用可能な問題の探求、また量子コンピュータの高速化に関する問題に関わる理論的研究がなされている。具体的には、分子の基底状態エネルギーを求める量子化学的問題がここでは扱われている。本問題を実装する際には、多数の量子ビットを操作し、多数の物理量の測定を行う必要がある。そこでこの測定において、両立可能な物理量の組を見極めることにより比較的少数の測定のみを用いて量子計算を実行することは計算の効率化につながることになる。本章においては、量子化学的問題を多量子ビットに変換し、そのうえで同時測定の問題が効率化されるアルゴリズムを提案し、また提案手法について IBM の量子コンピュータ上で実装を行っている。</p> <p>第6章は、合成系における非局所性に関する研究が扱われている。ここでは二者間ではなく三者間におけるモノガミーの問題が、量子論をも仮定しない一般的原理により論じられている。モノガミーとは Alice と Bob が強くエンタングルしている場合には Alice と Charlie はほとんどエンタングルできないという関係をあらわしている。この性質は量子論の枠内では成り立つことが知られ、量子暗号などの安全性の根拠ともなっている。本章では、このモノガミーを、量子論を仮定せず情報因果律と呼ばれる一般的原理だけから導出している。</p> <p>第7章では、文脈依存性 (contextuality) に関する研究を行っている。contextuality の議論は Bell-CHSH と同様に、隠れた変数の否定に関する問題である。既存の結果の多くは、Kochen-Specker の定理などのように数学的に不可能性を証明するというものであり、実験的検証と馴染むものではなかった。それに対し、本章ではこの contextuality に関して実験的検証可能な不等式が取り上げられており、また IBM の量子コンピュータを用いた検証結果が説明されている。</p> <p>第8章には、全体のまとめと今後の展望が記述されている。</p>			

（論文審査の結果の要旨） 量子論の基礎に関する研究では、以下の二つの手法が考えられる。一つは量子論の枠内で量子論を用いると何ができるか（またできないか）を探る手法、もう一つは量子論を含む一般的な枠組みの中でどのように量子論が特徴づけられるかを調べる手法である。本論文では、この両方のアプローチにより、特に操作の両立不可能性に焦点をあてながら研究が行われている。その主な内容と成果は以下の通りである。

（１）量子論における物理量と量子チャネルの両立不可能性について構造論的研究を行った。物理量の識別可能性と量子チャネルの非擾乱性に着目し、物理量空間と量子チャネル空間に半順序構造を導入した。この二つの半順序構造間に両立可能性を通じて一定の関係が存在することを証明した。本結果は、既存の種々の定量的な情報攪乱関係についてその基礎づけを与えるものとなっている。

（２）量子論における合成系の構造について基礎的研究を行った。量子論における状態空間の合成系は操作論的観点からは一意に定まらない（テンソル積の非一意性）。この問題に関して、物理量のエンタングルメントという概念を導入し、そのエンタングルメントの有無を検出することができる不等式の提案を行った。また、この不等式の実験的検証も IBM の量子コンピュータを用いて行っている。

（３）量子論における両立不可能性の量子コンピュータへの応用を行った。量子コンピュータの実装に関して大きな問題は、そのエラーの低減と実行時間の短縮である。本研究では、情報の取り出しにおける物理量の測定をより効率的に行う手法として、両立可能な物理量の同時測定を考えた。この際、多くの物理量をより少数の同時測定可能な組にグルーピングすることが問題となる。本研究では、エンタングルした物理量を用いてこのグルーピングを行う手法を提案している。また、この手法の検証を IBM の量子コンピュータで実装により行っている。

（４）量子論を仮定せず少数の物理原理からモノガミーの導出を行った。三者間についてエンタングルメントの関係を規定するモノガミーの性質は量子暗号などにおいて基本的役割を果たす。本研究では、このモノガミーが、量子論を仮定せず情報因果律という基本原理のみから導出されることを証明している。

（５）量子論における文脈依存性の研究を行った。Bell-CHSH 不等式とともに、文脈依存性の議論は隠れた変数の否定につながる量子論の基礎的な話題である。本研究では検証可能な不等式を用いた議論を導入し、その検証を IBM の量子コンピュータにより行っている。

以上のように本論文は両立不可能性を軸としながらもいくつかの異なる側面から量子論基礎とその応用の研究を行ったものである。また、理論的研究と実験的検証を含んでおり、その独創性も高い。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和２年１月２２日に論文内容とそれに関する試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降